

セグメント締結材の開発

石澤 秀文* 白上 勝章**

要 旨

シールドトンネルにおいて、貯留管など内水圧が作用するトンネルの需要が高まりつつある。従来、内水圧が作用する場合はボルトまたは二次覆工への配筋などで対応している。一方、ほぞ付きセグメントは、建設コスト縮減の流れのなかで二次覆工省略型のセグメントとして施工実績を増やしている。しかし、ほぞ付きセグメントのピース間継手は、内水圧により発生する継手間の引張力に抵抗できる構造ではない。そこで、経済性に優れたほぞ付きセグメントの利点を生かしつつ内水圧トンネルの需要に対応するため、内水圧に抵抗可能なセグメントの開発を目標とし、新しい継手構造部材としてアラミド繊維シートを主材料とするセグメント締結材を考案した。

このセグメント締結材の引張実験を行った結果、以下のことがわかった。

耐腐食性および内面平滑性を確保でき、所要のセグメント間引張力に抵抗できる。

セグメント締結材取付部分に対するセグメント本体の補強方法について課題を残している。

1. まえがき

近年、都市部において地下河川や下水道の一時貯留管など内水圧が作用するシールドトンネルの需要が高まりつつある。平成7年には(財)先端建設技術センターより「地下河川内圧トンネル覆工構造設計要領(案)」が示された。これは内水圧が作用する一次覆工だけのシールドトンネルの計画・設計に適用される¹⁾。すなわち、「二次覆工省略型+内水圧対応型」のセグメントを対象としており、これによってトンネル掘削断面の縮小や工期短縮などによるコスト縮減が可能である。

当社においては二次覆工省略型セグメントとしてほぞ付きセグメントを海外より技術導入し、実用化している。しかし、図-1に示すようにほぞ付きセグメントのセグメントピース間継手は平面と凸ほぞの突き合わせとなるため、内水圧が作用した場合のセグメントピース間に発生する引張力に抵抗する構造ではない。そこで、この引張力に抵抗できるセグメント締結材を考案し、ほぞ付きセグメントを「二次覆工省略型+内水圧対応型」のセグメントに拡張するための開発に取り組んでいる。

ほぞ付きセグメントの組立ボルトは、完成時に撤去可能である。このボルトに防食処理を施し残置すれば内水圧に対応することが可能であるが、継手に発生する引張力が大きくなると、ボルト本数の増加などによりコスト高となる。したがって今回は、ボルトによる対応では不経済となるような場合を想定した。

本報告では、新たに考案したセグメント締結材について開発の目標、セグメント締結材の概要、基礎実験の結果および今後の課題について述べる。

2. 開発の目標

「二次覆工省略型+内水圧対応型」のセグメントに求められる機能は、耐腐食性 内面の平滑化 耐久性 止水性 継手部に発生する引張力の処理などである。二次覆工省略型セグメントに求められてきた機能はであり、は内水圧に対応するための機能である。

開発の目標として、耐腐食性に対しては従来、ステンレスボルトの使用や表面のコーキングなどで対応してきたが、コスト高になるため、安価な非鉄材料を用いることとする。

止水性の確保は、基本的にシール材の止水性能によることとし、内水圧に対して継手部の目開きがシール材性能を損なわない目開き量(許容目開き量を3mmに設定)に抑制できるようにする。

継手部に発生する引張力に対しては、新たに考案したセグメント同士の締結方法で抵抗する。今回の実験では、内水圧によって継手部に発生する引張力に抵抗するためのセグメント締結材を開発することを目標とした。

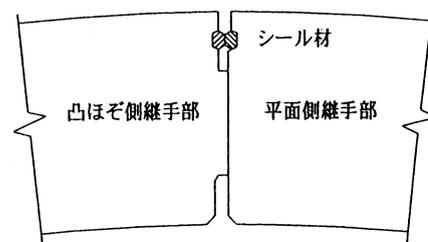


図-1 ほぞ付きセグメントのセグメントピース間継手

* 土木設計部 ** 東京支店

セグメント締結材の主材料は、引張力に対して高い耐力をもつアラミド繊維シートで、このシートはエポキシ系樹脂により硬化、成形できるため比較的簡単に複雑な形状のものを作ることが可能である。本研究・開発では、まず内水圧対応型セグメントを適応させる条件、範囲の検討を行った。次に、セグメント締結材の形状の決定、セグメント締結材単体での引張実験、コンクリート供試体を使用した引張実験を行った。

3. セグメントピース間に発生する引張力

3.1 引張力の概念

図-2に示すように、土圧、水圧などの外荷重に比較して内水圧が卓越する場合、セグメントおよびセグメントピース間には軸方向引張力が発生する。

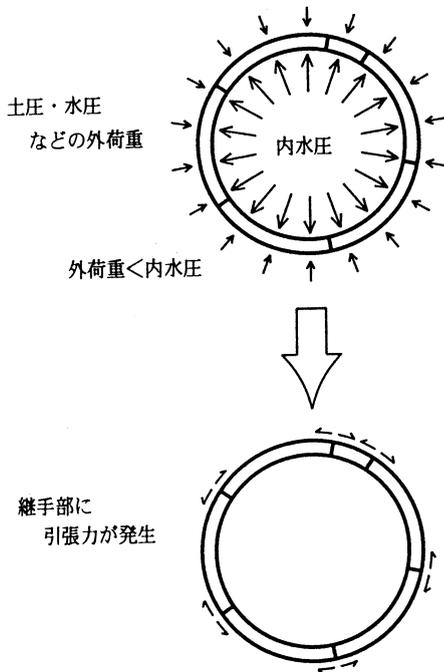


図-2 セグメントに作用する荷重

3.2 想定引張力

表-1に示すように本研究・開発ではセグメント径(図心径)毎に想定内水圧作用時のセグメントピース間引張力を算定し、セグメント締結材で対応すべき範囲を選定した。表中の発生引張力は、内水圧だけが作用した場合の値を示している。

図-3に示すように地下水位と内水位の水頭差が10mの場合、作用内水圧は98kPaとなる。

継手の検討より、116kN以下の場合には、防食処理を行った継手ボルトを用いることで対応可能だが、それ以上の引張力では、必要なボルト本数の増加による施工性低下

や施工コスト増加からボルトでの対応は難しいと考えた。したがって、セグメント締結材を用いる条件は、引張力231kN以上とし、今回は引張力231kNを想定したセグメント締結材の開発に取り組んだ。

セグメントピース間継手1カ所につき2個のセグメント締結材を設置すると、1個あたりの引張耐力は、116kN(231 / 2 = 116kN)以上必要となる。

表-1 内水圧により発生する引張力

内水圧 kPa (tf/m ²)	セグメント径別引張力 (kN) (セグメント幅は単位幅1m)		
	φ3,000mm	φ6,000mm	φ10,000mm
98 (10)	116	231	385
196 (20)	231	462	769
294 (30)	346	693	1154

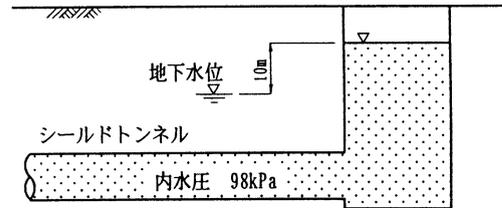


図-3 外水圧と内水圧の水頭差

4. セグメント締結材の概要

4.1 材料の特性

アラミド繊維シートは引張方向に高強度を有し、単位幅(1m)あたりの保証耐力により規格化されている。アラミド繊維シートの特性を表-2に示す。

表-2 アラミド繊維シートの特性(シート1層)

保証耐力 kN/m (tf/m)	588 (60)	882 (90)	1,176 (120)
設計厚さ mm	0.252	0.378	0.504
引張強度 N/mm ² (kgf/cm ²)	2,352(24,000)		
弾性率 kN/mm ² (kgf/cm ²)	78.4(0.8×10 ⁶)		
破断伸度 %	3.0		

4.2 セグメント締結材の形状と取り付け

セグメント締結材は、施工性、製品加工の容易性、経済性の観点から図-4および写真-1に示す小判形とした。

図-5にセグメント締結材の取り付け位置を示す。継手1カ所あたり2個のセグメント締結材をセグメント製作時に予め設けた溝にはめ込む。したがってセグメント

締結材を取り付けてもトンネル内面の平滑性を確保することが可能である。また、セグメント組立時に取り付ける必要はなく、組立の施工サイクルの一工程にはならないので、シールド工事のサイクルタイムに影響をおよぼすことはない。

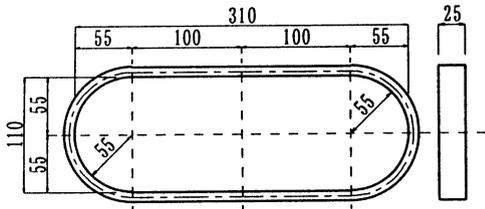


図 - 4 セグメント締結材の形状寸法

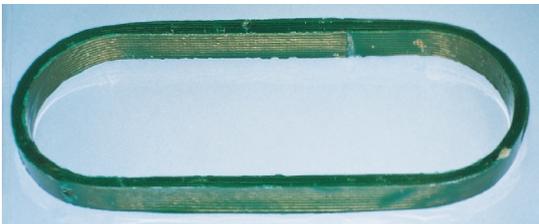


写真 - 1 セグメント締結材

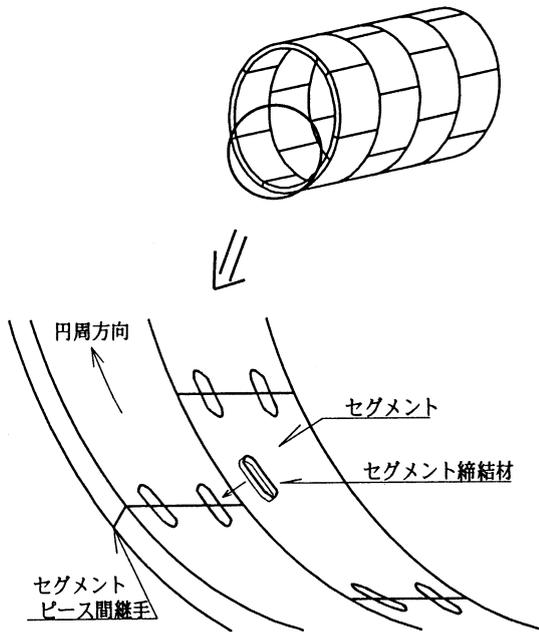


図 - 5 セグメント締結材の取り付け位置

4.3 セグメント締結材の製作

今回の製作は、基礎実験段階ということもあり、全て手作業で行った。製作用具と製作工程を写真 - 2 ~ 5 に示す。



写真 - 2 製作用具一式

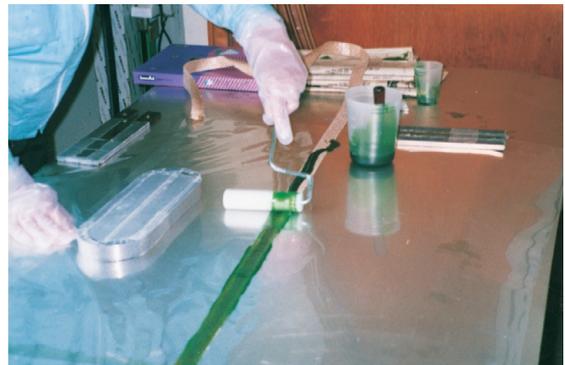


写真 - 3 エポキシ系樹脂の含浸



写真 - 4 アラミド繊維シートの成形



写真 - 5 成形完了

5. セグメント締結材引張実験

5.1 実験概要

セグメント締結材の引張特性を確認するために表-3に示す3段階での実験を実施した。100t万能型試験機にセグメント締結材を取り付け、引張荷重、ひずみを測定した。写真-6に実験状況、写真-7にセグメント締結材の破断状況を示す。

表-3 実験段階

実験段階	目的	実験日
第1段階	製品加工したセグメント締結材の基本性能を評価する	1998年 5月
第2段階	手作業で製品加工した影響を確認をする	1998年 6月
第3段階	セグメント締結材の伸びに着目し積層枚数を確認する	1998年11月



写真-6 実験状況



写真-7 セグメント締結材破断状況

5.2 実験結果と考察

5.2.1 第1段階

セグメント締結材のシート幅、積層枚数、アラミド繊維シートの規格(保証耐力)をパラメータとして実験を行った結果、いずれも目標値(116kN)を上回ることが確認できた。表-4に実験ケースと結果を示す。セグメントの配筋と取り付け溝の干渉を考慮すると、セグメント締結材のシート幅を小さくする必要があることから、第2、3段階の実験においてはCASE No.5のシート幅25mmのセグメント締結材を用いることとした。

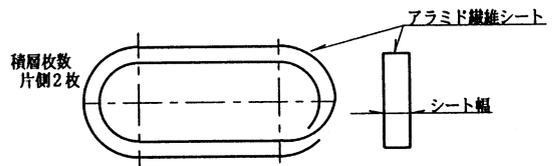


図-6 シート幅と積層枚数

表-4 実験ケースと結果(第1段階)

CASE No.	シートの保証耐力 kN/m (tf/m)	積層枚数 片側(枚)	シート幅 (mm)	平均破断 強度(kN)
1	588 (60)	2	60	168
2	588 (60)	4	50	270
3	882 (90)	2	50	204
4	1176 (120)	1	50	147
5	1176 (120)	2	25	132

5.2.2 第2段階

今回、セグメント締結材は手作業で製作した。したがって、第2段階では手作業による強度低下率、および強度のばらつきを把握することを目的として、表-4のCASE No.5のセグメント締結材を用いて供試体を24個製作し、各供試体の破断強度を測定した。表-5に実験結果を示す。

表-5 実験結果(第2段階)

供試体No.	1	2	3	4	5	6	
破断強度(kN)	132	123	122	137	118	123	
供試体No.	7	8	9	10	11	12	
破断強度(kN)	102	101	128	120	128	127	
供試体No.	13	14	15	16	17	18	
破断強度(kN)	101	128	128	107	114	107	
供試体No.	19	20	21	22	23	24	
破断強度(kN)	128	116	119	118	126	136	
	最大値(kN)		137		最小値(kN)		101
	平均値(kN)		120		標準偏差		10.5

アラミド繊維の構成から算出した供試体の理論引張強度は196kNである。今回の実験では理論引張強度(196N)に対して、61%(平均値と比較)の強度発現にとどまっ

ている。アラミド繊維シートの製作時に機械的に張力を与えながら成形した場合、理論引張強度に対して70% (137kN)の強度発現が可能なることから、手作業による影響がでたものと考えられる。

5.2.3 第3段階

セグメント締結材の伸びと積層枚数の関係を確認するために、積層枚数が2、4、8枚の場合について、ひずみと伸びを測定した。図-7に応力とひずみの関係、図-8に積層枚数と伸び(116kN作用時)の関係を示す。積層枚数を8枚とした場合、目標とする引張耐力(116kN)に対して許容値以下(目標目開き量3mm以下)となることからわかる。しかし、セグメント締結材製作時におけるシートのゆるみやたわみがあるので、機械的に製作した場合は伸びをさらに抑制することができると思われる。

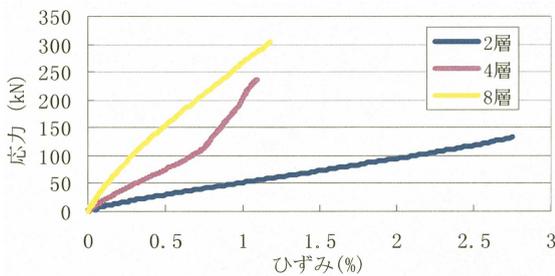


図-7 応力とひずみの関係

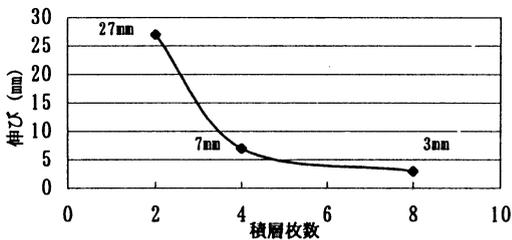


図-8 積層枚数と伸びの関係(116kN作用時)

6. 供試体引張実験

6.1 実験概要

セグメント締結材を取り付けたセグメントの継手部に引張力が発生すると、引張力はセグメントに伝達される。このとき、図-9に示すようにセグメント締結材取付部分でせん断破壊を起こす可能性がある。そこで効果的なセグメントのせん断補強方法を抽出することを目的として、図-10に示す2ケースについて検討した。併せて、セグメント締結材を取り付けたときのセグメント締結材のひずみ分布状況を確認した。図-11に実験概要図、写真-8に実験状況を示す。

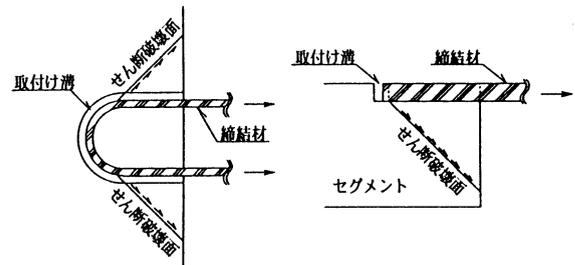


図-9 セグメントのせん断破壊

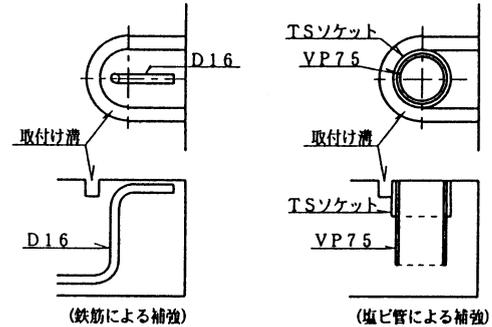


図-10 せん断補強方法

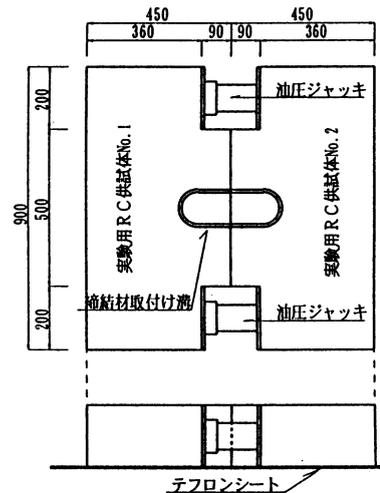


図-11 実験概要図



写真-8 実験状況

6.2 実験結果と考察

表 - 6 にせん断補強方法別の破壊時荷重を示す。いずれのケースも目標とする耐力 (116kN) を満足することができなかった。両ケースともに補強が不十分であるためコンクリートがせん断破壊を起こしている。写真 - 9 にCASE2の破壊状況を示す。破壊時には塩ビ管が変位しており、塩ビ管を介して引張力がコンクリートに伝達されせん断破壊を起こしていることが確認できる。しかし、実施工を想定した場合、鉄筋による補強 (CASE1) では補強鉄筋のかぶり厚が十分にとれないため塩ビ管による補強方法 (CASE2) の方が現実的である。そのためには塩ビ管が引張力に対して抵抗できる構造を考案しコンクリートのせん断破壊を防ぐ対策が必要となる。

図 - 13 にCASE1におけるセグメント締結材の荷重とひずみの関係を示す。これより直線部(ゲージ No.4)のひずみの増加が大きく、曲線部(ゲージ No.1, 7)が小さいことが確認できた。したがって、セグメント締結材の伸びは直線部分の影響が大きく、この直線部分を短くすることで伸びを減少させることができると考えられる。

表 - 6 破壊時荷重

CASE No.	せん断補強方法	最大荷重 (kN)
1	鉄筋	73.2
2	塩ビ管	33.8



写真 - 9 破壊状況 (CASE2)

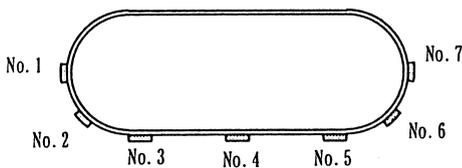


図 - 12 ひずみゲージ貼付位置

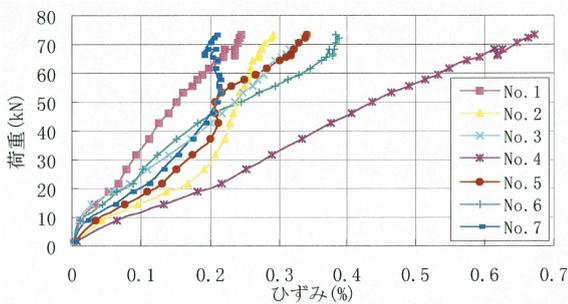


図 - 13 荷重とひずみの関係 (CASE1)

7. あとがき

本報告で得られた結果と今後の課題について以下に示す。

アラミド繊維シートを主材料としたセグメント締結材は、内水圧により作用するセグメントピース間引張りに抵抗することが可能である。

今回用いたセグメント締結材の製作は手作業によるものであり、その影響による強度低下が確認できた。今後、基礎実験の段階でセグメント締結材の形状を変更し手作業により試作する場合は品質の低下を考慮する必要がある。

セグメント締結材の形状やシートの積層枚数が伸びやひずみ分布に影響を与える。小判形の場合、直線部分でのひずみが大きいことから、直線部分を減少させることで伸びを抑えることができる。したがって、セグメント締結材がより円形に近い形であれば伸びに対して有効であると考えられる。

今回考案したセグメントのせん断補強方法では十分な耐力を得ることができなかった。塩ビ管を固定する方法を含め補強方法を検討する必要がある。塩ビ管の固定方法としては、鉄筋による補強が考えられる。配筋については、鉄筋が有効に作用する配置を検討する必要がある。

セグメント締結材の研究・開発は、帝人(株)との共同開発により進めているが、実用化に向け引き続き検討を行う予定である。

参考文献

- 1) (財)先端建設技術センター：地下河川内圧トンネル覆工構造設計要領(案)、1995.3
- 2) 帝人(株)：ARシステム技術資料[テクノラシート編] 1997.5